

Fig. 1 : les principaux sites du secteur de Saint-Maime (photo IGN).

UN ASPECT MÉCONNU DU PARC NATUREL DU LUBERON: LES MINÉRAUX DE PYROMÉTAMORPHISME DE SAINT-MAIME (ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE)

Georges FAVREAU*, Nicolas MEISSER** & Pierre-Jacques CHIAPPERO***

RÉSUMÉ :

S'il est bien connu à une large échelle pour ses fossiles remarquables, le Parc naturel du Luberon l'est en revanche moins au point de vue minéralogique. L'Association française de microminéralogie (AFM) en collaboration avec différentes institutions de recherche en minéralogie autant en France qu'en Suisse, a étudié les minéraux rencontrés au voisinage des anciennes exploitations de lignite de Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence). Ces minéraux sont le résultat d'un phénomène géologique peu connu : le pyrométamorphisme à paralaves. Celui-ci consiste en une transformation des roches sédimentaires par une combustion à haute température, alimentée par les sédiments carbonés contenus dans le sol. Il en résulte une série de minéraux, se présentant en cristaux millimétriques et inframillimétriques, présentant des analogies avec ceux que l'on rencontre dans les volcans, et comprenant essentiellement des silicates. Les conditions de gisement sont abordées, puis une description de tous les minéraux rencontrés est donnée, parmi lesquels des espèces peu courantes, comme l'esseneite, dont ce fut la première découverte en France.

Mots-clés :

minéralogie, pyrométamorphisme, paralaves, esseneite.

ABSTRACT :

An original aspect of the Luberon natural park: minerals from pyrometamorphism at Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence)

Widely famous for its outstanding fossils, the Luberon natural park has been less studied from a mineralogical point of view. The "Association française de microminéralogie" (French association for mineralogy, or AFM), in co-operation with several research organizations, has undergone a study of the minerals found in the vicinity of the old brown coal mines at Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence). These result from a little-known phenomenon, called pyrometamorphism, which consists in the transformation of sedimentary rocks through high temperature combustion, fuelled by carbon-rich sediments found underground. As a result, can be observed a series of minerals in crystals of millimeter size and smaller, sharing common features with those met in volcanoes, and mainly comprising silicates. The geological environment is outlined, followed by a description of all the minerals found, including uncommon species, such as esseneite, which was first described in France from this locality.

Keywords :

mineralogy, pyrometamorphism, paralava, esseneite

* Président d'honneur de l'Association française de microminéralogie (AFM). 421, av. Jean Monnet, 13 090 Aix-en-Provence.
E-mail : favreaug@aol.com

** Conservateur de musée. Musée géologique & Institut de minéralogie et géochimie, Université Anthropole, CH-1015 Lausanne, Suisse.
E-mail : nicolas.meisser@unil.ch

*** Maître de conférences - Muséum national d'histoire naturelle – USM 201 Département Histoire de la Terre, 61, rue Buffon CP 52 – 75 005 Paris.
E-mail : chiappero@mnhn.fr

INTRODUCTION

Initialement connue des amateurs de microcristaux pour ses échantillons d'aragonite, la localité de Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence) a livré, après examen attentif, un ensemble de minéraux tout à fait particuliers qui est décrit ici. L'intérêt minéralogique de ce site est constitué par les silicates qu'il contient, famille peu représentée (si on excepte le quartz) dans les terrains sédimentaires couvrant l'essentiel du département des Alpes-de-Haute-Provence. Il est à noter que ces terrains peuvent localement présenter des concentrations de minéraux métalliques - et le célèbre gisement de sulfosels de Saint-Pons près de Barcelonnette en est certainement l'exemple le plus emblématique - mais leurs minéraux se sont tous formés à basse température, et les seuls silicates présents se réduisent bien souvent au quartz et à quelques minéraux du groupe des argiles.

Non loin du village de Saint-Maime (Fig. 1), les minéraux qui font l'objet de cette note ont été observés au sein de roches semblant avoir été fondues. L'origine de ces roches n'a rien à voir avec une quelconque activité volcanique. Le phénomène dont elles résultent est appelé **pyrométamorphisme** (littéralement « transformation par le feu »). Les roches à l'origine de la transformation constituent le **protolithe** et les roches résultantes sont nommées **paralaves**, par analogie avec les roches issues des volcans.

Le pyrométamorphisme aboutissant à des paralaves est un phénomène géologique peu courant dans notre pays. Il consiste en une transformation partielle ou totale de roches par fusion suite à une combustion, le plus souvent de charbon ou lignite. C'est en particulier un des processus qui transforment les terrils embrasés, comme à Saint-Etienne (Loire), Decazeville (Aveyron) ou dans le Nord de la France. Caractérisé par de hautes températures et de faibles

pressions, le phénomène donne naissance à un cortège de minéraux inhabituels, dont cette étude constitue à notre connaissance le premier exemple en Provence. Rappelons que le terme de pyrométamorphisme s'applique aussi pour les transformations minérales réalisées au contact d'une coulée de lave. Nous citerons en France l'exemple classique de Boisséjour, avec ses porcelanites résultant de la cuisson d'argilites par une coulée de basalte.

Des analogies importantes existent avec les espèces rencontrées à Lapanouse-de-Sévérac, dans l'Aveyron, mais dans cette dernière localité les conditions de formation des minéraux des paralaves ont été mises en place par l'exploitation des schistes bitumineux autour de la Seconde Guerre Mondiale (Eytier *et al.*, 2004). Ce gîte a donc une origine anthropique.

Le gisement de Saint-Maime semble indépendant de toute exploitation minière, mais apparaît très lié à la présence de lignite. Nous avons donc jugé utile de donner un aperçu rapide des activités d'exploitation de lignite conduites à proximité, afin de permettre une meilleure compréhension du contexte. L'histoire minière de la Haute-Provence est en général mal connue des amateurs de minéraux, certainement parce que le secteur n'a pas été généreux en échantillons minéralogiques remarquables. Même si elle a façonné la région, et mériterait donc des développements plus importants, nous nous contenterons de quelques repères.

À Saint-Maime, l'exploitation minière s'est échelonnée entre 1874 et 1949. Le lignite et le charbon ont été initialement utilisés en remplacement du bois pour la forge et la cuisson de la chaux, puis pour le chauffage, et ont été employés à la centrale électrique de Sainte-Tulle, l'usine de Saint-Auban et diverses industries de la région provençale. L'exploitation, démarrée à flanc de coteau, se poursuit en profon-

Association française de microminéralogie (AFM)

L'étude a été effectuée dans le cadre de l'Association Française de Microminéralogie, association loi de 1901 qui a pour but la constitution et la diffusion des connaissances sur les microminéraux (minéraux observables à l'aide d'une loupe et dont la taille varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres). Comptant actuellement près de 450 membres, l'association s'attache en particulier à la mise en valeur du patrimoine minéralogique national, par la réalisation d'études et d'inventaires publié au moyen du magazine « Le Cahier des Micromonteurs » et le site web de l'association : <http://www.micromineral.org>

deur à partir du lieu-dit “Collet Rouge” au sud de la route de Volx à Forcalquier. Ensuite fut mis en production le site du “Puits Neuf”, à l’est du village, où l’on peut encore observer le chevalement après sa réhabilitation, fruit du travail de passionnés de la mine.

Aujourd’hui, les réseaux sont en partie inondés, mais la mine du Collet Rouge est actuellement le siège de phénomènes de combustion qui auraient débuté en 1998 à la faveur de glissements de terrain. Cinquante ans après la fermeture de la mine, ceci apporte des arguments à la thèse d’une origine naturelle de la mise en place des minéraux que nous avons étudiés. Cette minéralogie inhabituelle constitue une facette du Parc naturel du Luberon que le lecteur aura, nous l’espérons, plaisir à découvrir.

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

La commune de Saint-Maime, située dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, s’inscrit dans la partie orientale de la région du Luberon, célèbre notamment pour ses gisements fossilifères d’âge Oligocène. Le gisement du Bois d’Asson est connu pour une riche flore fossile, maintenant protégée par la Réserve naturelle géologique du Luberon¹. L’ensemble de la commune fait, lui, partie du périmètre de protection.

À l’Oligocène, il y a environ 35 millions d’années, une grande partie du Luberon est recouverte d’immenses lacs et lagunes sous un climat tempéré à tropical. De considérables dépôts de sédiments, atteignant 500 à 2000 m, s’accumulent au fond de ces étendues d’eau. Viennent s’y intercaler de grandes quantités de débris végétaux dont la fossilisation donnera naissance aux gisements de lignite exploités en mines, et dont on peut, ça et là, observer quelques minces couches restées en place.

Par la suite, au Miocène, une mer chaude et peu profonde envahit totalement la région. L’aspect actuel

de la région est mis en place par l’érosion puissante des rivières Durance et Verdon, nées au retrait de la mer du Miocène.

Les couches exploitées dans les mines de Saint-Maime pouvaient atteindre une puissance de 2,80 m, mais les photographies d’époque montrent des couches plus près de 60 à 80 cm (soit environ un avant bras plus une main, mesure utilisée par les mineurs pour les boisages). Le pendage (inclinaison) des couches varie de 0° pour certaines, jusqu’à 90°. En tout, on dénombre une vingtaine de couches de roches carbonées, organisées en quatre faisceaux productifs, présentés de la base au sommet². Les deux premiers faisceaux regroupent les lignites utilisés dans l’industrie :

- **Faisceaux bitumineux**, qui comprennent des lignites riches en goudrons. Ils ont été exploités à Bois d’Asson dans quatre couches utiles : mine grise, mine fine, couche Siffren et couche de la Forge

- **Faisceaux de Queyron**, principalement exploités, qui regroupent 14 couches comprenant 20 m de lignite, dont 11,50 m exploitables. Lorsque les couches sont proches, elles ont été parfois exploitées ensemble, offrant ainsi des chantiers de plus de 2 m

- **Faisceaux du Toit**, qui regroupent deux couches de 2,20 et 2,50 m qui ont été exploitées à Bois d’Asson, donnant un lignite maigre utilisé pour le chauffage domestique

- **Faisceaux de Sigonce**, qui ont été exploités seulement à Sigonce.

Le nom de « Collet Rouge » nous a intrigués. Est-ce en référence aux porcelanites³, issues de la combustion de schistes et que contiennent de nombreux terils un peu partout (Nord de la France, Decazeville, etc.). De telles roches sont observables en abondance à Bois d’Asson au bord de la D13.

Outre le charbon, un autre phénomène géologique fit couler beaucoup de salive dans la région (et ce n’est pas terminé) : il s’agit des fameux « diamants de Saint-Maime ». Le seigneur de Saint-Maime en aurait orné son habit à la Cour de France et on dit que le roi,

1. Rappelons que sur les sites classés en Réserve naturelle (ex : Bois d’Asson tout proche), l’extraction et le ramassage des minéraux et des fossiles sont interdits (il s’agit d’endroits précis). Sur le périmètre de protection, l’extraction est interdite, mais le ramassage des pièces délogées par l’érosion est autorisé, en quantité raisonnable (il s’agit du reste de l’aire couverte, hors sites classés).

2. Description empruntée au Musée de Saint-Maime

3. Argile ou schiste semi-vitrifié, pouvant ressembler à du jaspe.

jaloux, le fit jeter en prison. Vous aurez reconnu les cristaux « bipyramidaux » de quartz que l'on trouve classiquement dans les terrains sédimentaires, comme les marnes, et dont la région est particulièrement riche.

Nous allons voir dans la partie minéralogie que le sous-sol du secteur renferme d'autres minéraux qui, s'ils n'excitent pas autant l'imagination, n'en demeurent pas moins remarquables.

La création de la **Réserve naturelle** remonte au 16 septembre 1987 (décret ministériel). Le périmètre de protection a été institué par l'arrêté préfectoral du 6 mai 1996. Les échantillons décrits ici ont été prélevés avant cette date et il convient aujourd'hui de suivre les prescriptions relatives à la collecte dans le cadre du périmètre de protection, que nous avons rappelées. Aujourd'hui, sauf autorisation de la Préfecture (renseignements et formulaires disponibles auprès du gestionnaire, le Parc naturel régional du Luberon), il est interdit de creuser le sol à la recherche d'échantillons.

DESCRIPTION DU GISEMENT

L'affleurement étudié se situe sur la commune de Saint-Maime, à 15 km au nord-ouest de Manosque, dans une région sédimentaire, essentiellement calcaire. Ces calcaires peuvent faire place localement à des marnes et grès de texture et couleurs fort variables (vert, ocre, rosâtre, jaunâtre, etc.), bien observables notamment le long de la RD13 de Volx à Forcalquier, au niveau de Bois d'Asson.

Le gisement se présente sous la forme d'un affleurement de dimensions réduites (4 à 5 mètres d'extension maximale), dont les roches constituent une couche d'épaisseur variable, tendant à s'amincir tout en s'élevant vers le sud. La couche présente également un pendage faible vers l'intérieur du talus. Elle est surmontée d'un niveau calcaire compact et de sables plus ou moins compacts, en rubans de couleur jaune à brun-rouge, et s'appuie sur une dalle calcaire grise compacte associée à des marnes rosâtres.

Les blocs minéralisés que nous avons observés se trouvent en place dans cette couche, ainsi qu'au pied du talus, où ils ont pu rouler. La couleur brique de certains d'entre eux et les plis que présentent d'autres rappellent fortement les caractéristiques des laves, ce qui a motivé les premières recherches. Les roches se répartissent approximativement en trois types principaux, classifiés de la périphérie vers le cœur du gisement, et qui renferment des minéralisations aux caractéristiques homogènes :

- Une première variété de roche, légère et poreuse, de couleur brun rougeâtre à noire, généralement moins compacte que les autres roches, rappelle certaines laves légères, ou même des résidus de fourneaux ou mâchefer (blocs de « type I »).

- Le second type de roches est caractérisé par un aspect vitreux, une couleur brun-jaune clair à violacé et ne comporte que de rares vacuoles de petite taille (blocs de « type II »). Les blocs de type II semblent se former à la périphérie des blocs de type III, plus près de l'encaissant. Ils sont caractérisés par l'abondance des sulfates (gypse et accessoirement thaumasite) dans les vacuoles, tandis que la gangue est riche en mélilite.

- Enfin, des roches d'un troisième type, denses comme les précédentes, mais de couleur vert sombre, gris sombre à rouge, sont formées d'une pâte à grands cristaux visibles et présentent de nombreuses vacuoles, souvent de grande taille (blocs de « type III »).

Ces trois types de roches présentent des signes évidents d'une cuisson à température élevée, suffisante pour provoquer leur fusion. La similitude chimique entre les minéraux récoltés et les roches encaissantes, ainsi que la présence à proximité de nombreux filons de lignites, objets de l'exploitation minière, permet d'avancer l'hypothèse de sédiments carbonés qui, en se consumant naturellement en profondeur, auraient fait fondre marnes, calcaires et grès. De tels gisements à base de lignite sont connus ailleurs, et notamment aux États-Unis (Wyoming et Est du Montana notamment), où les explorateurs du siècle dernier comme Lewis et Clark les avaient évoqués dans le récit de leurs aventures.

On notera qu'à la différence de Lapanouse-de-Sévérac (Eytier *et al.*, 2004), les xénolites⁴, sources importantes d'espèces rares, sont ici totalement absents. La fusion du protolithe semble avoir été complète à Saint-Maime.

Classification des minéraux

Les espèces minérales sont définies par des caractéristiques chimiques (leur formule) et des éléments géométriques (leur réseau cristallin ou structure). La couleur, l'éclat, etc. qui peuvent être utilisés pour décrire un échantillon, ne sont pas des critères retenus pour la définition d'une espèce minérale. C'est un peu comme dans le domaine du vivant, où ce sont ses gènes qui définissent une espèce de fleur, et non sa couleur. Un organisme international, l'IMA, dans lequel siègent des minéralogistes professionnels, se charge de l'homologation des espèces minérales. On compte actuellement un peu plus de 4 500 espèces connues dans le monde. Une espèce minérale doit être le résultat de processus naturels, ce qui empêche, par exemple, l'homologation d'espèces issues des activités industrielles de transformation de roche.

Il est d'une pratique courante d'organiser les minéraux chimiquement au sein de groupes, partageant des éléments ou groupes d'éléments communs. Ainsi les carbonates sont les minéraux contenant du carbone et de l'oxygène, associés dans des groupements CO_3 (un atome de carbone, entouré de 3 atomes d'oxygène). Ces carbonates sont des minéraux bien connus, puisque sous forme de calcite (mais aussi d'aragonite ou dolomite), ils constituent l'essentiel des roches calcaires. Les silicates, de façon similaire, sont des minéraux où le silicium est associé à l'oxygène. Ils sont les composants principaux des roches telles que le granite, le schiste, le basalte. Les groupes sont répartis au sein de 10 classes : [natifs – alliages], [sulfures – arséniures – antimoniures – tellurures – sulfosels], halogénures, oxydes, [carbonates – nitrates – borates], [sulfates – chromates – molybdates], wolframates, [phosphates – arsénates – vanadates], silicates, et enfin minéraux organiques.

L'organisation des atomes les uns par rapport aux autres au sein des molécules et l'agencement des molécules par rapport à leurs voisines constituent la structure des minéraux. À une structure microscopique, valable au niveau d'une molécule ou un ensemble de molécules, correspondent des caractéristiques macroscopiques, en particulier les formes des cristaux que l'on peut observer. Cet édifice cristallin se construit par répétition d'un motif élémentaire, appelé la maille, dont les dimensions selon les trois axes de coordonnées du système cristallin sont notées a, b, et c (qui sont également les noms des axes, excepté pour les systèmes hexagonal et rhomboédrique). On regroupe les minéraux au sein de 7 systèmes cristallins : système cubique, orthorhombique, quadratique, hexagonal, rhomboédrique, monoclinique et triclinique, correspondant à des éléments de symétrie propres.

Les méthodes d'analyse des minéraux utilisées dans cette étude sont destinées à en déterminer la structure par diffraction de rayons X (XRD – « X – Ray Diffraction ») ou la composition chimique quantitative ou qualitative (EDS « Energy Dispersive Spectroscopy » ou WDS – « Wavelength Dispersive Spectroscopy »). Il est bien souvent suffisant de procéder à l'une de ces analyses pour connaître l'identité du minéral.

4. Inclusions de roche originale peu ou pas transformée.

DESCRIPTION DES ESPÈCES MINÉRALES

Les minéraux observés dans les différents types de roches se répartissent en deux ensembles principaux :

- Les produits directs de la cuisson des roches du protolithe, que l'on retrouve en général comme constituants de la roche finale, mais aussi en cristaux automorphes⁵ dans les cavités. Il s'agit de minéraux de haute température, essentiellement des silicates riches en aluminium (pouvant provenir de sédiments argileux), calcium (issu des calcaires) et fer (souvent contenu dans pyrite et marcassite dans les niveaux sédimentaires).

- Des minéraux postérieurs, de basse température, apparemment déposés par l'action de fluides sur les roches. Il s'agit essentiellement de carbonates (calcite et aragonite), sulfates (gypse et thaumasite) et une zéolite⁶, la gismondine.

Les minéraux de Saint-Maime ont été en grande partie identifiés visuellement. Toutefois, certaines espèces rares ou d'un faciès inhabituel ont fait l'objet de 16 analyses par diffraction de rayons X (XRD) et de 15 analyses chimiques (EDS et WDS) (cf. encadré « Classification des minéraux »).

Oxydes et Hydroxydes

Hématite Fe_2O_3

L'hématite est très abondante dans les roches légères (type I), dont elle tapisse parfois entièrement les vacuoles.

Ordinairement, il s'agit d'enduits sans forme cristalline observable, gris-noir ou irisés (vert, violet), offrant un support contrasté à des cristaux blancs de calcite ou d'aragonite. Moins souvent, on peut observer des tablettes épaisses noires et arrondies (< 1,5 mm), ou même des écailles irrégulières rouge sombre. Dans tous ces faciès, l'identification de ce minéral est visuelle et basée sur la couleur rougeâtre de la poudre.

L'hématite a été analysée par XRD ; l'échantillon analysé montre des aiguilles épaisses et grises groupées en oursins (< 2 mm) à l'intérieur de blocs de type I.

Magnétite $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$

Des grains noirs vitreux et brillants de magnétite ont été reconnus visuellement dans la roche, où ils peuvent être très nombreux tout en restant généralement de très petite taille (0,1 mm). L'analyse d'un échantillon par WDS a montré une faible teneur en Al, illustrant la solution solide⁷ entre la magnétite, Fe_3O_4 et l'hercynite, $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$. Le grain analysé présente 90% de magnétite et 10% d'hercynite.

Plus rarement, le minéral constitue de petits dodécaèdres rhomboïdaux⁸ (0,3 mm) ou octaèdres⁹ aux faces ternes dans les vacuoles des roches de type III, en association avec l'esseneite et la wollastonite.

Carbonates

Aragonite CaCO_3 (Fig. 2)

Le gisement a été connu initialement pour ses cristallisations d'aragonite, qui ont motivé les premières recherches des amateurs. Nous avons été intrigués par la gangue de ces pièces d'aragonite, dont l'aspect était pour le moins inattendu en Haute-Provence. C'est donc ce minéral qui nous a conduits à nous intéresser à Saint-Maime. Il est localement très abondant, surtout dans les roches de types I et III, et semble moins répandu dans celles de type II. On l'observe sous deux formes principales, reconnues visuellement :

- en concrétions vermiculaires blanches (< 10 mm), rappelant les excentriques des grottes à concrétions calcaires, et se trouvant surtout dans les roches les plus altérées,

- en aiguilles incolores à blanc vif, parfois aplaties et striées, groupées en oursins (< 3 mm).

5. Disposant de formes propres, par opposition à des grains formés dans les intervalles laissés par d'autres grains.

6. Silicates caractérisés par un squelette de silice et d'oxygène, capable de fixer dans leur structure d'autres atomes ou molécules en remplacement de certains atomes. Leurs applications industrielles sont basées sur cette propriété.

7. On parle de solution solide quand il peut y avoir substitution de deux espèces similaires au sein d'un même minéral.

8. Solide régulier à 12 faces losangiques.

9. Solide régulier à 8 faces triangulaires.

Il n'est pas toujours facile de différencier l'aragonite de la thaumasite, surtout pour les variétés aciculaires fines, mais on peut faire la distinction de deux façons, visuelle et chimique. Quand les terminaisons sont observables, on se souviendra que celles de la thaumasite présentent généralement un pinacoïde¹⁰ à contour hexagonal, tandis que l'aragonite est systématiquement pointue. D'autre part, l'effervescence très forte de l'aragonite à l'acide chlorhydrique est un bon moyen, malheureusement destructif, de distinguer les deux espèces. L'aragonite est essentiellement associée à la calcite.

Calcite CaCO_3 (Fig. 3)

Répandue dans tous les types de roches, la calcite y est incolore à blanche et forme le plus souvent des rhomboédres¹¹ pointus aux arêtes légèrement courbes (1 mm). On trouve parfois des cristaux en forme de fuseaux pointus, plus ou moins allongés et qui peuvent être parfois perchés au bout de pédoncles incolores et rigides, apparemment constitués de calcite ou d'aragonite.

La calcite est associée aux minéraux de formation plus récente, comme le gypse, l'aragonite et la thaumasite. Elle est aisément distinguée du gypse par sa dureté ou son effervescence aux acides, mais en présence de cristaux épais et très pointus, il est parfois difficile de dire si on a affaire à de la calcite ou de l'aragonite. Sporadiquement, de la calcite strictement aciculaire a été observée et analysée par XRD.

Sulfates

Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Les cristaux de gypse sont très fréquents, quelle que soit la roche. Ils sont parfois profondément corrodés, et ne subsistent d'eux que des enveloppes creuses et striées.

Le contour des cristaux est généralement irrégulier, mais dans les roches les plus compactes (type III),

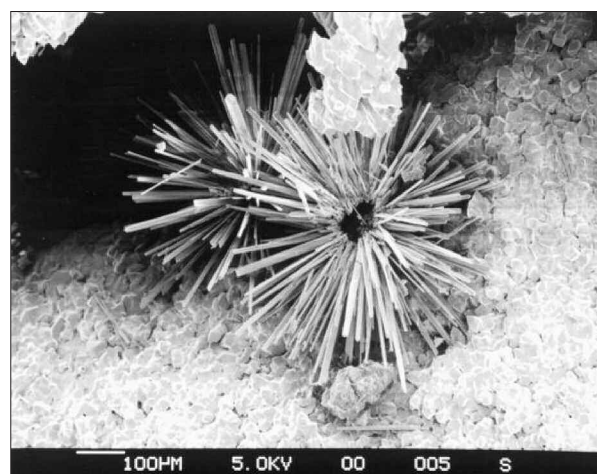


Fig. 2: Aragonite aciculaire, photo MEB (PJC).

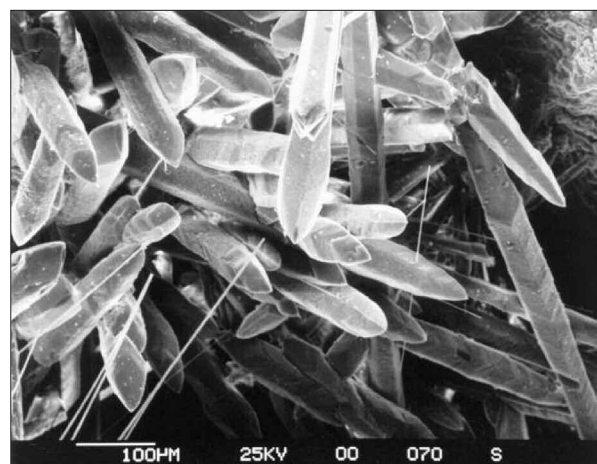


Fig. 3: Calcite, cristaux très allongés, photo MEB (PJC).

se trouvent de petits cristaux nets limpides, (< 2 mm), trapus, avec des faces losangiques ou en prismes allongés. L'identification est purement visuelle et basée sur la faible dureté, la flexibilité et le clivage¹² caractéristique du minéral.

10. Face terminale d'un cristal selon l'axe cristallographique «c» ou «z».

11. Solide à 6 faces, chacune en forme de parallélogramme.

12. Cassure d'un minéral présentant une surface plane, reflétant la structure interne du minéral.

Silicates

Anorthite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Ce feldspath a été observé en petits cristaux lamellaires incolores et losangiques (< 1 mm), largement représentés dans les roches de types II et III. L'anorthite est fréquente, mais difficile à observer; elle est associée à la mélilite ou la wollastonite. Son identification sous ce faciès repose sur l'analogie visuelle avec les pièces en provenance de contextes volcaniques (Iles Eoliennes en particulier) et aussi les échantillons que nous avons fait analyser à Lapanouse-de-Sévérac.

Des cristaux prismatiques ont été trouvés (< 1 mm) montrant une section losangique, presque carrée, incolores et terminés par de larges faces obliques. Parfois presque parallélépipédiques, ils rappellent les cristaux de danburite du Mexique (San Luis Potosi) ou des roches volcaniques de Vetralla (Latium, Italie). Leur analyse par XRD et EDS a montré qu'il s'agissait d'anorthite *stricto sensu*, sans sodium. Ces cristaux sont associés à la mélilite brun-rouge, la leucite ou l'aragonite dans les roches de type III et présentent un clivage parfait perpendiculaire à l'allongement.

Danburite $\text{CaB}_2(\text{SiO}_4)_6$

Extrêmement rare dans le site, un minéral en tablettes épaisses blanches, hexagonales, s'est révélé être de la danburite après analyse XRD et EDS. Les cristaux ressemblent beaucoup à de la tridymite ou au faciès pseudo-hexagonal de la wollastonite.

On peut légitimement se questionner sur l'origine du bore dans une telle paragenèse. Il s'avère que cet élément est particulièrement concentré dans les sédiments lacustres continentaux, du reste c'est dans ce type d'environnement que se localisent les grands gîtes mondiaux (Californie, Turquie, Bolivie). Il n'est donc pas étonnant de retrouver un peu de bore dans les paralaves. Reste bien entendu à connaître l'expression minéralogique du métalloïde dans le protolithe (niveaux de borates, inclusions fluides de saumures?). Mais l'ulexite, borate répandu, ressemble à s'y méprendre à du gypse fibreux, et a donc pu être confondue avec ce dernier.

Esseneite CaFeAlSiO_6 (Fig. 4 & 5)

Un des composants essentiels des roches de type III est un minéral sombre, vitreux, assez proche visuellement de l'augite. L'allure tout à fait particulière des cristaux nous avait particulièrement intrigués¹³. La détermination en esseneite par analyse en diffraction de RX réalisée par P.-J. Chiappero a été confirmée par Nicolas Meisser dès 1992 au moyen d'une analyse WDS. L'esseneite est un pyroxène¹⁴ décrit pour la première aux Etats-Unis et dont il s'agit à notre connaissance de la première occurrence en France. C'est cette espèce qui a clairement montré l'origine pyrométamorphique du gîte car ce pyroxène se forme dans des conditions oxydantes (le fer est sous la forme de fer ferrique Fe^{3+}).

L'esseneite doit son nom à Eric J. Essene, professeur à l'Université du Michigan et découvreur des premiers spécimens en compagnie de Mike Cosca, minéralogiste à l'Université de Lausanne. Elle fut initialement décrite au ranch de Durham, dans le bassin de la Powder River, Campbell Co., Wyoming, où elle dérive de la fusion de sédiments au contact de veines de charbon naturellement consommées (Cosca & Peacor, 1987). On remarquera que la description de ce minéral est récente, puisqu'elle remonte à 1987 seulement, chose très surprenante pour un minéral qui peut être localement abondant. Les cristaux les plus grands signalés à Durham ranch atteignent 8 mm, ce qui représente une taille bien supérieure aux spécimens de Saint-Maime (max. 3 mm). Les minéraux associés, comme à Saint-Maime, comprennent anorthite, mélilite et magnétite.

À Saint-Maime, les cristaux bien formés se présentent sous un seul aspect, très homogène, avec un prisme très développé et une terminaison en biseau oblique. Leur couleur est généralement vert-brun très sombre à noir, les cristaux les plus fins étant parfois brun-jaune. Il serait intéressant de procéder à une campagne d'analyse sur les cristaux de diverses couleurs pour voir si cela traduit une chimie différente, et en particulier si l'augite peut être reconnue. L'esseneite

13. Nous avons par la suite appris que cet aspect des cristaux n'est pas exclusif de l'esseneite et qu'il existe des cristaux d'augite comparables.

14. Groupe de minéraux aux propriétés physiques et chimiques voisines, constitué de silicates orthorhombiques ou monocliniques de formule ABZ_2O_6 , avec A = Ca, Fe, Mg, etc., B = Al, Fe, Mg, etc. et Z = Al, Si.

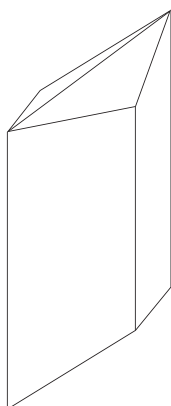


Fig. 5: Esseneite, orientation non standard.

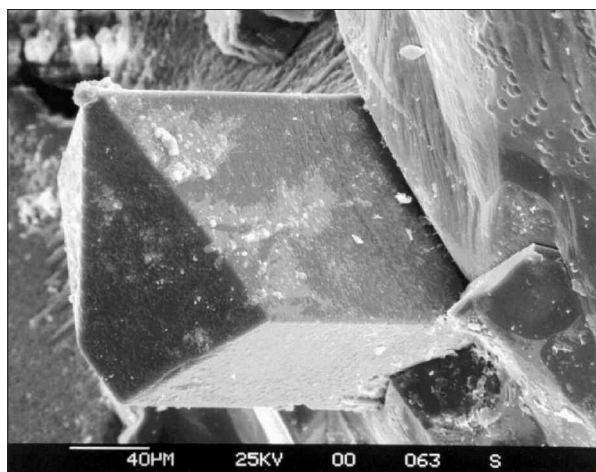


Fig. 4: Esseneite, cristal trapu, photo MEB (PJC).

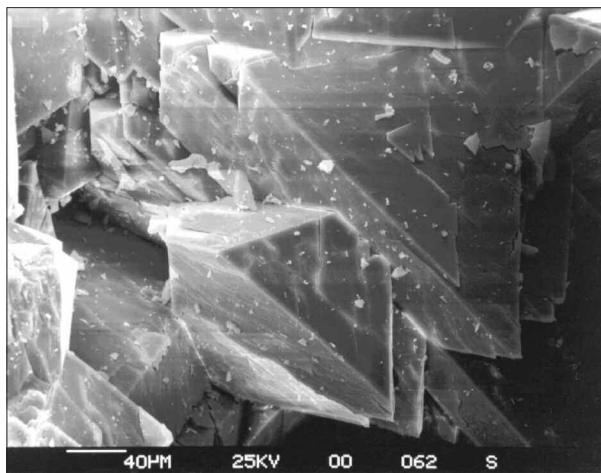


Fig. 6: Gismondine, photo MEB (PJC).

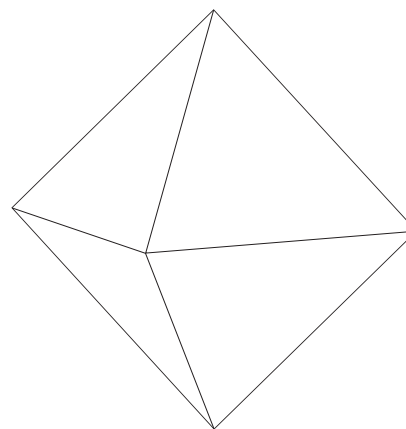


Fig. 7: Gismondine pseudo-octaédrique.

est systématiquement associée à la wollastonite, et parfois aussi à la calcite. On ne l'a pas observée dans les roches de types I et II.

L'analyse chimique¹⁵ par WDS d'un cristal conduit à établir la formule suivante, très proche de celle observée par Cosca et Peacor (1987) dans le gisement-type: $\text{Ca}_{0,99}(\text{Fe}^{3+}_{0,74}\text{Mg}_{0,14}\text{Al}_{0,09})_{\Sigma=0,97}(\text{Si}_{1,26}\text{Al}_{0,74})_{\Sigma=2,00}\text{O}_6$

Gismondine $\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 6 & 7)

La gismondine est la seule zéolite du gisement, où elle a été déterminée par XRD. Minéral de basse température, elle donne des indications sur les conditions de formation des espèces tardives, puisqu'elle cristallise entre 80 et 90°C. Elle se présente en petits cristaux pseudo-octaédriques incolores (le minéral est en fait monoclinique, semblant quadratique avec un rapport a/c proche de 1). Ne dépassant pas 0,3 mm, ils sont situés dans les vacuoles des blocs de type II, qui ont générale-

15. Les indices de la formule ne sont pas des nombres entiers, car il peut exister des substitutions d'atomes par d'autres tout en conservant la même structure et la même chimie dominante, qui caractérisent une espèce.

ment subi une décoloration locale de couleur rougeâtre, et qui contiennent en outre méililite et gypse.

Ces cristaux, souvent associés en groupes à croissance parallèle, sont difficiles à observer du fait de leur limpidité. Leur aspect rappelle la gismondine observée dans les blocs calcaires transformés de Bellerberg (Eifel, Allemagne) et de Boisséjour (Puy-de-Dôme).

Grossulaire $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ (Fig. 8 & 9)

Un minéral ressemblant à un grenat a été trouvé dans les roches de type II, où il est peu répandu. Généralement en grains à cassure conchoïdale et éclat résineux, il forme accessoirement des trapézoèdres¹⁶ réguliers brun foncé et brillants (< 0,8 mm), souvent recouverts de fins prismes hexagonaux incolores de thaumasite.

Par cohérence chimique avec les autres minéraux, il était vraisemblable qu'il s'agisse du grenat à Ca et Al, c'est à dire du grossulaire, ou bien du grenat à Ca et Fe, l'andradite. Une analyse par XRD a bien confirmé qu'il s'agissait d'un grenat, et des analyses complémentaires par EDS on permis d'en préciser sa nature : un grossulaire ferrique avec un rapport aluminium/fer ~ 77/23. La présence de l'andradite, où Fe l'emporte sur Al, n'est néanmoins pas à exclure sur d'autres échantillons.

Hydroxyllestadite $\text{Ca}_{10}[(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3](\text{OH})_2$

Seul représentant du groupe de l'apatite et autres minéraux isostructuraux¹⁷, l'hydroxyllestadite a été observée en fines baguettes dans les roches de type III (< 3,5 mm), en association avec des lattes incolores de wollastonite.

Il a été possible de confirmer l'identité de ce minéral par XRD et EDS. L'analyse chimique par EDS n'a pas mis en évidence du chlore ou du fluor dans le minéral, démontrant ainsi la diagnose de l'hydroxyllestadite, qui semble un minéral très rare à Saint-Maime. Ses baguettes sont incolores, brun-vert très clair à brun foncé. Elles ne sont pas terminées, ou alors de façon extrêmement aiguë, et servent de support à de petits octaèdres de magnétite ou des cristaux incolores de gypse, qu'elles embrochent parfois.

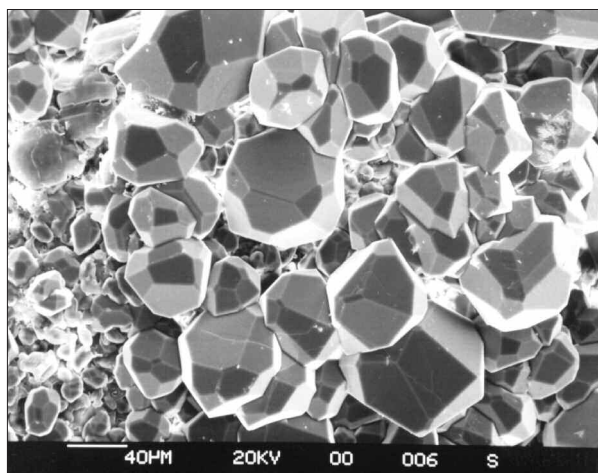


Fig. 8: Grossulaire, photo MEB (PJC).

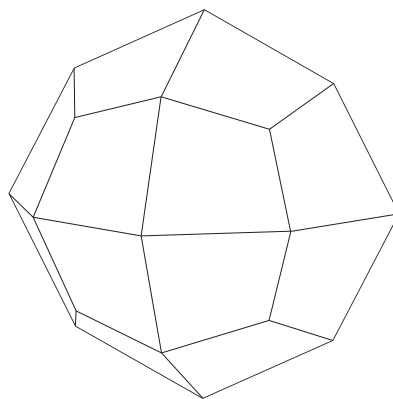


Fig. 9: Grossulaire, trapézoèdre, seule forme observée.

Leucite KAlSi_2O_6

La leucite est exceptionnelle, et se présente uniquement dans les blocs de type III en classiques trapézoèdres incolores et brillants de petite taille (< 0,4 mm). Elle a été identifiée par XRD et accompagne des tablettes carrées épaisses et brunes de méililite.

16. Solide régulier à 24 faces en forme de trapèze, forme très courante pour des minéraux tels les grenats.

17. Espèces partageant la même structure cristalline.

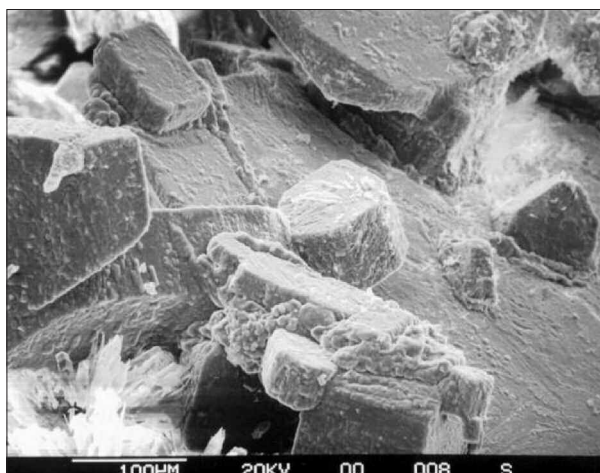


Fig. 10 : Ménilite, aspect rugueux typique des cristaux, photo MEB (PJC).

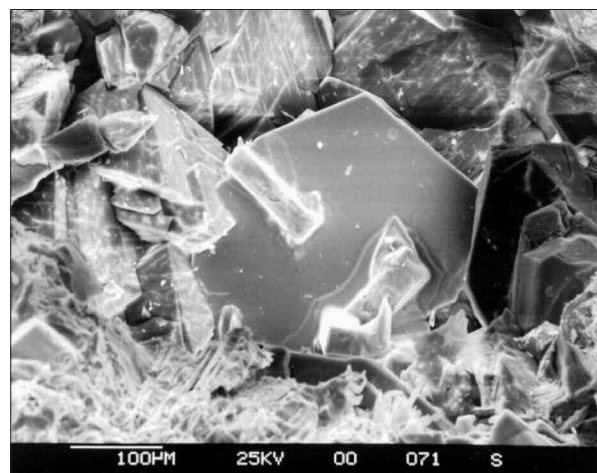


Fig. 11 : Wollastonite pseudo-hexagonale et ménilite, photo MEB (PJC).

Ménilite (Fig. 10 & 11)

Le terme « ménilite » désigne la série¹⁸ âkermanite ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) - gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$). En général, il n'est pas possible de conclure en l'absence d'analyses précises. Dans le cas de Saint-Maime, les analyses chimiques complétées par des diagrammes de diffraction aux rayons X, ont établi la présence massive de gehlenite. Ainsi, le magnésium est très peu présent et l'aluminium domine. Ceci semble assez normal car la dolomite n'est très probablement pas présente dans les marnes grillées et fondues, de par leur origine lacustre et non marine. Il s'agit là d'une différence importante avec le gisement de Lapanouse-de-Séverac.

Ce minéral se présente sous des formes variées. C'est le constituant principal des roches de type II : dans ce cas, il est brun-jaune clair, vitreux, et les cristaux observés sont essentiellement des parallélépipèdes et des cubes (< 0,5 mm). Il est bien évidemment associé à tous les minéraux qu'on y trouve.

Dans les roches de type III, il est plus rare : il est brun-rouge vitreux quand il n'est pas altéré et brun-jaune à brun verdâtre, terreux, après altération. Les cristaux sont alors des prismes octogonaux (< 1 mm) terminés par des pinacoïdes, de forme tabulaire ou plus allongée. Les faces latérales sont de large

variable. On trouve également des tablettes carrées épaisses brunes (< 0,7 mm) ou des « cubo-octaèdres » grisâtres à bruns (en fait, le minéral est quadratique et on doit plutôt rapprocher cet habitus¹⁹ de celui de l'apophyllite). La ménilite accompagne l'anorthite, la calcite et la wollastonite.

Thaumasite $\text{Ca}_6\text{Si}_2(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{12}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 12 à 15)

Parmi les produits de formation plus récente, la thaumasite tient une place importante, par la quantité et la variété des échantillons découverts. La confusion avec l'ettringite, un minéral du même groupe cristallochimique que la thaumasite est possible, toutefois, les analyses réalisées n'ont pas permis de découvrir de l'ettringite à Saint-Maime. Les fibres blanches et très fines, sont très courantes, parfois groupées en touffes soyeuses, rappelant des minéraux comme la dawsonite (analyse XRD).

Les cristaux bien formés sont moins fréquents et se trouvent principalement dans les roches de type II (et de rares roches de type I) sous les variétés suivantes :

- tonnelets striés longitudinalement, en groupes atteignant 4 mm, souvent sans aucun autre minéral dans les vacuoles (analyse XRD),

18. Ensemble de minéraux obtenus par substitution d'un ou plusieurs éléments entre des termes extrêmes, qualifiés de « pôles purs ».

19. Allure générale du cristal.

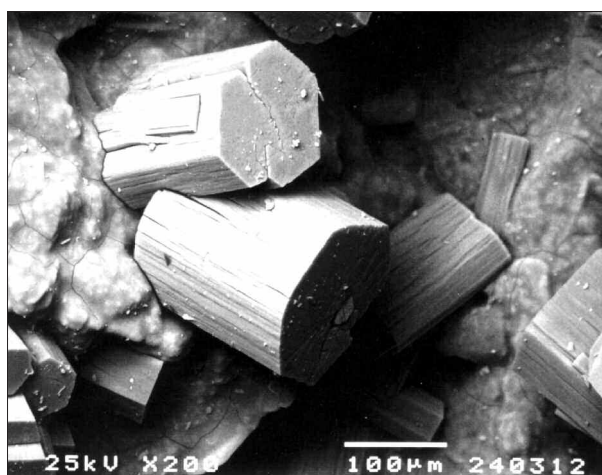


Fig. 12: Thaumassite, photo MEB (PJC).

- prismes hexagonaux pyramidés incolores (0,2 mm), couvrant les parois des vacuoles, en association avec le gypse,

- prismes hexagonaux incolores, très allongés (< 2 mm), terminés par un pinacoïde et fréquemment associés à la calcite ou la wollastonite pseudo-hexagonale. Cette forme a fait l'objet d'une confirmation par XRD. Ces cristaux ont été observés également au bout de fines fibres incolores de thaumassite (« sceptre »).

Tobermorite $\text{Ca}_{4.5}\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{O}, \text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

De minuscules lamelles (0,1 mm) très fines, flexibles, blanc nacré, ont été trouvées dans les vacuoles en association avec la thaumassite et le grenat dans les blocs de type II. Le minéral est exceptionnel à Saint-Maime et se trouve exclusivement au voisinage de ces espèces.

Par analogie avec les gisements de Bellerberg (Eifel, Allemagne) et de Boisséjour (Puy-de-Dôme), l'hydrocalumite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), était envisageable, mais une analyse XRD effectuée par Halil SARP au Muséum d'histoire naturelle de Genève (comm. pers.) a montré qu'il s'agissait de tobermorite. Il s'agit, avec la gismondine et la thaumassite, de l'un des rares minéraux rencontrés seulement à Saint-Maime et pas à Lapanouse-de-Sévérac.

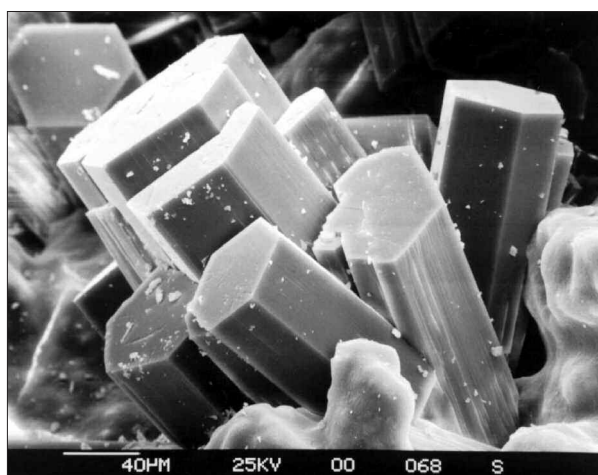


Fig. 13: Thaumassite, photo MEB (PJC).

Wollastonite CaSiO_3 (Fig. 11 & 16)

Les roches de type III sont composées d'esseneite et d'un minéral crème présentant un clivage parfait tout à fait caractéristique, parallèle à l'allongement. Les analyses ont montré qu'il s'agit de wollastonite, et plus précisément du polytype²⁰ monoclinique commun (ex- "wollastonite-2M", également nommé « parawollastonite » dans certains ouvrages anciens). C'est un minéral qui résulte habituellement de la transformation des calcaires, puisqu'on le trouve au contact d'intrusions ignées dans les calcaires, ainsi que dans les blocs calcaires éjectés par les volcans, ou bien même dans les marbres à minéraux.

Les cristaux observés sont des lattes rectangulaires allongées, le plus souvent de couleur crème, ou orange pâle, mais parfois même rosâtres ou incolores. Ils sont généralement biseautés, rappelant alors les cristaux, dits en « cercueil » ou en « burin », de la baryte (qui n'est pas monoclinique). Les faces sont très nettes, ce qui n'est pas fréquent pour le minéral. La wollastonite est principalement associée à l'esseneite, parfois à la mélilite.

Une forme plus rare consiste en tablettes assez petites (< 1 mm) de forme analogue à la tridymite, trouvées en association avec l'esseneite et la wollastonite en lattes des roches de type III. Elles sont à surface irrégulière et leur couleur est orangée. L'analyse par

20. Minéraux partageant la même formule chimique, mais pas la structure.

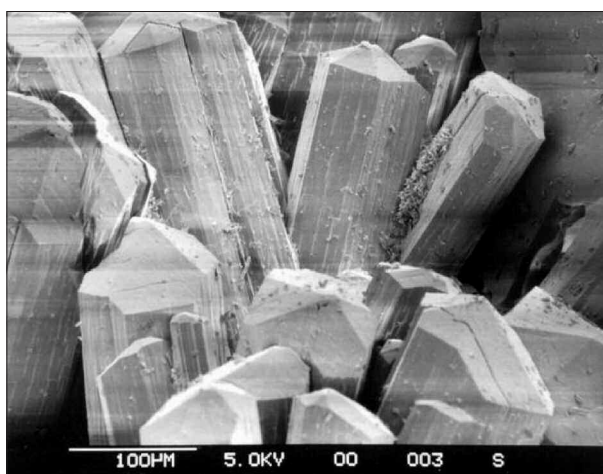


Fig. 14 : Thaumassite, prismes pyramidés, photo MEB (PJC).

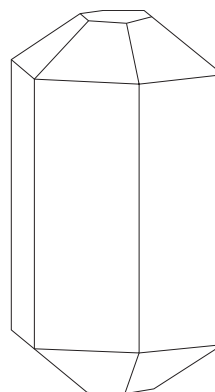


Fig. 15 : Thaumassite, prisme pyramidé.

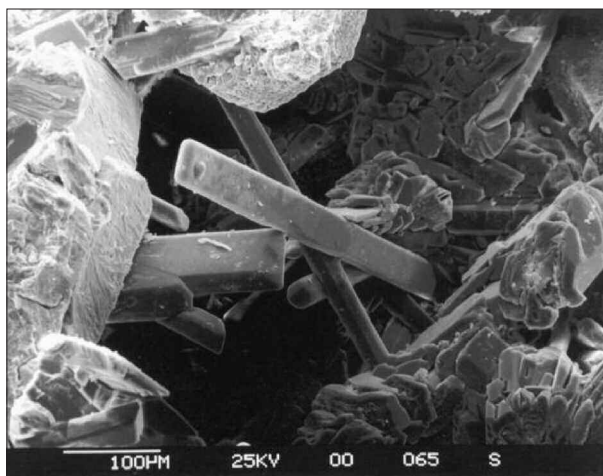


Fig. 16 : Wollastonite en lattes, photo MEB (PJC).

XRD a également montré qu'il s'agissait de wollastonite, qui présente là son faciès le plus inhabituel.

De minuscules tablettes hexagonales (< 1 mm), incolores ou blanches ont été trouvées sur la mélilite des blocs de type II, en association avec l'anorthite, et plus rarement en accompagnement de l'esseneite des roches de type III. Ces tablettes n'ont pas été analysées, mais une certaine similitude d'aspect avec les tablettes orange et avec des cristaux tout à fait similaires de Lapanouse-de-Sévérac nous laissent penser qu'il s'agit également de wollastonite.

L'analyse d'un cristal de wollastonite de Saint-Maime par WDS montre que celui-ci est très pur : $\text{Ca}_{0,95}\text{Fe}_{0,03}\text{Mg}_{0,01}\text{Si}_{1,00}\text{O}_3$

Inconnus

Il subsiste un petit nombre d'échantillons qui n'ont pas fait l'objet d'analyses du fait de leur petitesse ou leur rareté. Leur aspect est trop particulier pour les rattacher à une espèce avec un risque d'erreur raisonnable, mais il existe là une potentialité pour étendre la liste des espèces rencontrées.

Enfin, des études en lame mince des paralaves pourraient permettre de reconnaître encore d'autres espèces, en particulier celles dont la littérature décrit la présence dans ce genre de roches.

Récapitulatif des espèces minérales de Saint-Maime

N°	Minéral	Identification	Forme
1.	ANORTHITE	A	X
2.	ARAGONITE	NA	X
3.	CALCITE	A	X
4.	DANBURITE	A	X
5.	ESSENEITE	A	X
6.	GISMONDINE	A	X
7.	GROSSULAIRE	A	X
8.	GYPSE	NA	X
9.	HEMATITE	A	X
10.	HYDROXYLELLESTADITE	A	X
11.	LEUCITE	A	X
12.	MAGNETITE	A	X
13.	MELILITE (GEHLENITE)	A	X
14.	THAUMASITE	A	X
15.	TOBERMORITE	A	X
16.	WOLLASTONITE	A	X

Identification :

A (analysé rayons X et méthodes chimiques),

NA (trouvé mais non analysé).

Forme :

X (cristaux isolés).

CONCLUSION

Cette étude est restée longtemps sous notre coude, car nous souhaitions trouver un étudiant qui se pencherait sur le gisement dans le cadre d'un travail universitaire. Nous avons longuement hésité à procéder à une quelconque publication avant une étude scientifique complète du gisement.

En effet, publier signifie trop souvent condamner un gisement et le devenir de certains sites publiés récemment nous donne à réfléchir quant au sérieux de leurs visiteurs. Nous espérons donc que ceux qui viendront à Saint-Maime, veilleront à respecter la réglementation et permettent ainsi que subsistent les couches originales, ce qui pourra permettre de lever les incertitudes quant à l'origine du gisement. Nous pensons que celle-ci est naturelle, mais la proximité des installations industrielles liées à l'exploitation du lignite, peut faire penser à un accident qui aurait pu provoquer la combustion. Une étude scientifique, avec des levés de terrain et même de petits sondages, pourrait peut-être nous apporter quelques éléments de réponse.

REMERCIEMENTS

Un grand merci pour commencer aux scientifiques qui nous ont aidés à comprendre un peu mieux la nature de ces minéralisations par les analyses qu'ils ont pratiquées. L'essentiel des déterminations a été effectué au Musée géologique et à l'Institut de minéralogie et de géochimie de Lausanne ainsi qu'au BRGM à Orléans. Nous remercions également M. Halil Sarp, ancien conservateur de minéralogie au Muséum de la ville de Genève et qui a déterminé la tobermorite.

Nous adressons nos remerciements au Parc naturel régional du Luberon, en la personne de Mme Balme, qui a accueilli avec intérêt notre projet et M. Frapa qui nous a guidés pour la publication de cet article dans la revue du Parc.

Nous remercions aussi de son aimable accueil la mairie de Saint-Maime, ainsi que notre guide, Mariette Brochet, qui nous a fait partager sa passion pour son village et les hommes remarquables qui ont été les acteurs de l'aventure minière. Aujourd'hui, le souvenir de l'histoire minière n'est pas perdu. Il revit au « Musée de la Mémoire Ouvrière », inauguré en 2000 à Saint-Maime, où le visiteur pourra revivre avec émotion l'épopée du charbon en Haute-Provence.

BIBLIOGRAPHIE

En complément des articles de minéralogie énumérés ci-dessous, nous tenons à signaler ici un petit ouvrage fort intéressant, riche en photos anciennes de l'histoire de la mine. Il s'agit de « *L'album de la mine* » par Pierre BONNET aux éditions L'Œuvre au Noir, et que l'on peut se procurer au Musée de Saint-Maime.

CHESNOKOV B.V., KOTRLY M. & NISANBAJEV T., 1998. Brennende Abraumhalden und Aufschlüsse im Tscheljabinsker Kohlenbecken - eine reiche Mineralienküche", *Mineralien Welt*, n°3/98.

COSCA M. & PEACOR D.R., 1987. Chemistry and structure of esseneite (CaFeAlSiO_6), a new pyroxene produced by pyrometamorphism, *American Mineralogist*, vol. 72, n° 1-2, pp. 148-156

COSCA M., ROUSE R.R., ESSENE E.J., 1988. Dorrite [$\text{Ca}_2 (\text{Mg}_2\text{Fe}_4) (\text{Al}_4\text{Si}_2) \text{O}_{20}$], a new member of the aenigmatite group from a pyrometamorphic melt-rock", *American Mineralogist*, vol. 73, n° 11-12, pp. 1440-1448

EYTIER C., EYTIER J.R., FAVREAU G., DEVOUARD B. & VIGIER J., 2004. Minéraux de pyrométamorphisme de Lapanouse-de-Sévérac (Aveyron), *Le Cahier des Micromonteurs*, n°3, pp. 3-58

FAVREAU G., MEISSER N. & CHIAPPERO P.J., 2004. Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence), un exemple de pyrométamorphisme en région provençale, *Le Cahier des Micromonteurs*, n°3, pp. 59-91

FISCHESSER R., 1970. Données des principales espèces minérales, *Société de l'Industrie minérale (St Etienne)*, 682 p.

HARADA, NAGASHIMA K., NAKAO K. & KATAO A., 1971. Hydroxyllestadite, a new apatite from Chichibu mine, Saitama Prefecture, Japan, *American Mineralogist*, vol. 56, pp. 1507-1518

HENTSCHEL G., 1987. *Die Mineralien der Eifelvulkan*, 2^e édition, C. Weise Verlag (Munich), 176 p.

KABALOV Y.K., OECKLER O., SOKOLOVA E.V., MIRONOV A.B. & CHESNOKOV B.V., 1997. Subsilic ferrian aluminian diopside from the Chelyabinsk coal basin (Southern Urals) - an unusual clinopyroxene, *European Journal of Mineralogy*, vol. 9, pp. 617-621

MANDARINO J.A. & BACK M.E., 2004. Fleischer's Glossary of Mineral Species 2004, *The Mineralogical Record, Inc.*

RÜGER F. & WITZKE T., 1998. Häufige Begleiterscheinung des Ronneburger Uranerzbergbaus: Brände durch Selbstentzündung, *Lapis*, juillet/août 1998

SOKOL E., VOLKOVA N. & LEPEZIN G., 1998. Mineralogy of pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal-bearing spoil-heaps of the Chelyabinsk coal basin, Russia, *European Journal of Mineralogy*, vol. 10, pp. 1003-1014

VIGIER J., 2003. La minéralogie des paralavas de Lapanouse-de-Sévérac ", rapport de TER, *Université de Clermont-Ferrand*, juin 2003, 29 p.

WITZKE T., 1996. Die Bildung von Karbonaten als Ergebnis eines Tagebaubrandes in Ronneburg/Thüringen", *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft*, B. 1, *European Journal of Mineralogy*, vol. 8, p. 315

WITZKE T., 1996. Die Minerale der brennenden Halde der Steinkohlengrube "Deutschlandschacht" in Ölsnitz bei Zwickau, Sachsen, *Der Aufschluss* n°47, pp. 41-46